

УДК 52-48

## ОСНОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ КОСМОЛОГИИ

*В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева*

### Аннотация

Статья посвящена достижениям физической космологии, опирающимся на стандартную модель Вселенной и ее развитие.

**Ключевые слова:** космологическая стандартная модель, первичные космологические возмущения, образование структуры Вселенной.

---

### Введение

Наблюдаемые свойства структуры Вселенной подтверждают вывод о том, что структура возникла из случайного гауссова поля затравочных возмущений плотности, которое генерируется квантово-гравитационным образом в ранней квази-фридмановской Вселенной. Для обеспечения необходимой амплитуды начальных неоднородностей интенсивность быстропеременного гравитационного потенциала в момент их параметрического рождения должна была быть очень велика, в простейших моделях  $H \sim 10^{13}$  Гэв, что составляет  $10^{-6}$  массы Планка. Мы кратко обсудим достижения и проблемы стандартной космологической модели и уроки экстраполяции известной физики на случай высоких энергий.

Детальный анализ рассматриваемых проблем интересующийся читатель может найти в нашей книге [1].

### 1. От наблюдений и эксперимента к физике ранней Вселенной

Наблюдаемая структура Вселенной – это результат произведения стартовых условий и условий эволюции поля возмущений плотности. Современные наблюдательные данные позволили определить характеристики возмущений плотности в разные эпохи его развития. Тем самым удалось разделить информацию о начальных условиях этого поля и об условиях его развития, что положило начало независимому исследованию физики ранней и поздней Вселенной. Основой экстраполяции, позволяющей исследовать раннюю Вселенную, являются общая теория относительности и стандартная модель элементарных частиц.

Связь между ранним и поздним периодами космологической эволюции невозможна без понимания состава материи, когда важнейшим моментом является так называемая проблема совпадений. Известно, что в пределах одного порядка величины в современной Вселенной имеется приближенное равенство

$$\rho_E \approx \rho_M \approx \rho_b, \quad (1)$$

где  $\rho_E$ ,  $\rho_M$ ,  $\rho_b$  – космологические плотности темной энергии (ТЭ), темной материи (ТМ) и барионов соответственно. Отметим, что приближенное соотношение  $\rho_M \approx \rho_b$  справедливо в каждый момент космологической эволюции после образования барионной асимметрии и генерации ТМ, поскольку  $\rho_M$  и  $\rho_b$  одинаковым

образом уменьшаются с течением времени. С другой стороны,  $\rho_E$  очень слабо зависит от времени, так что первое из равенств (1) справедливо именно в современную эпоху.

Соотношения  $\rho_R \ll \rho_m$ ,  $\rho_E \lesssim \rho_m$  между плотностями энергии радиации  $\rho_R$ , темной энергии  $\rho_E$  и вещества  $\rho_m = \rho_M + \rho_b$  имеют прямое отношение к возможности генерации структуры во Вселенной. Гравитационная неустойчивость развивается только в период доминирования нерелятивистской материи и невозможна ни на радиационно-доминированной стадии, ни на стадии доминирования темной энергии. Однако для образования структуры необходимо выполнение еще одного условия: начальная амплитуда возмущений должна быть именно такой, чтобы неоднородности успели вырасти в эпоху открытия «окна» гравитационной неустойчивости. В нашей Вселенной оба необходимых условия выполнены: начальные возмущения ( $\sim 10^{-5}$ ) успевают подрасти и образовать крупномасштабную структуру Вселенной в период открытия «окна», когда возраст Вселенной составляет от 300 тыс. до 20 млрд. лет.

Под термином *ранняя* Вселенная в современной космологии подразумевают заключительную стадию ускоренного расширения с последующим переходом к горячей фазе эволюции (Большой взрыв). Сегодня нам неизвестны параметры Большого взрыва, имеются только верхние ограничения (см. (2.)). Однако существует хорошо разработанная теория рождения космологических возмущений, позволяющая рассчитать спектры начальных возмущений плотности вещества и первичных гравитационных волн в зависимости от значений космологических параметров.

Ситуация с *поздней* Вселенной диаметрально противоположна. Мы располагаем достаточно точной моделью — знаем состав материи, законы развития структуры, значения космологических параметров, но не имеем общепринятой теории происхождения компонент материи.

Известные нам свойства видимой Вселенной позволяют описать ее геометрию в рамках теории возмущений. Малым параметром является начальная амплитуда скалярных космологических возмущений. В нулевом порядке Вселенная является фридмановской и описывается единственной функцией времени — масштабным фактором  $a(t)$ . Первый порядок устроен несколько сложнее. Возмущения метрики являются суммой трех независимых мод — скалярной  $S(k)$ , векторной  $V(k)$  и тензорной  $T(k)$ , каждая из которых характеризуется своей спектральной функцией волнового числа  $k$ . Скалярная мода описывает космологические возмущения плотности, векторная мода ответственна за вихревые движения вещества, а тензорная мода — это гравитационные волны. Таким образом, вся геометрия описывается с помощью четырех функций —  $a(t)$ ,  $S(k)$ ,  $V(k)$  и  $T(k)$ , из которых нам известны сегодня лишь первые две (в некоторых областях определения).

Большой взрыв представлял собой катастрофический процесс быстрого расширения, сопровождаемый интенсивным быстропеременным гравитационным полем<sup>1</sup>. В ходе космологического расширения возмущения метрики спонтанно рождались параметрическим образом из вакуумных флуктуаций, как рождаются любые безмассовые степени свободы под действием внешнего переменного поля. Анализ наблюдательных данных свидетельствует в пользу именно такого квантово-гравитационного способа рождения затравочных возмущений плотности, из которых в ходе развития возникла крупномасштабная структура Вселенной.

Отметим основные свойства рожденных  $S$ - и  $T$ -полей возмущений: гауссова статистика (случайные распределения в пространстве), выделенная временная фаза (растущая ветвь решения), отсутствие выделенного масштаба в широком

<sup>1</sup>Вопрос о причинах Большого взрыва и доинфляционном состоянии ранней Вселенной является важнейшей проблемой современного естествознания.

диапазоне длин волн, недискриминированная амплитуда гравитационных волн. Последнее имеет решающее значение для построения модели ранней Вселенной, поскольку, имея простейшую связь с фоновой метрикой, гравитационные волны несут прямую информацию об энергетическом масштабе Большого взрыва. В силу конформной инвариантности V-мода не генерируется параметрическим образом.

В результате роста скалярной моды возмущений образовались галактики и другие астрономические объекты. Анизотропия и поляризация реликтового излучения возникли задолго до появления галактик в результате воздействия на распределение фотонов всех космологических мод возмущений. Совместный анализ наблюдательных данных о распределении галактик и анизотропии реликтового излучения позволил определить амплитуды  $S$ - и  $T$ -полей возмущений (см. (7)). Пользуясь условием, что сумма  $S + T \lesssim 10^{-10}$  фиксирована величиной анизотропии, получаем верхнее ограничение на тензорную моду возмущений в нашей Вселенной:

$$r \equiv \frac{T}{S} < 0.1. \quad (2)$$

В случае, если бы это неравенство было нарушено, величина возмущений плотности оказалась бы недостаточной для образования наблюдаемой структуры Вселенной.

## 2. Параметрическая генерация полей возмущений

Эффект квантово-гравитационного рождения безмассовых полей хорошо изучен. Так могут рождаться частицы вещества [2, 3] (хотя, например, реликтовые фотоны возникли вследствие распада протоматерии в ранней Вселенной). Таким же образом происходит генерация гравитационных волн [4] и возмущений плотности [5, 6], поскольку эти поля также относятся к безмассовым, и их рождение не запрещено пороговым энергетическим условием.

Теория  $S$ - и  $T$ -мод возмущений во фридмановской Вселенной сводится к квантово-механической задаче об эволюции независимых осцилляторов  $q_k(\eta)$ , находящихся во внешнем параметрическом поле  $\alpha(\eta)$  в мире Минковского с временной координатой  $\eta = \int dt/a$ . Действие и лагранжиан элементарных осцилляторов зависят от их пространственной частоты  $k$ :

$$S_k = \int L_k d\eta, \quad L_k = \frac{\alpha^2}{2k^3} (q_k'^2 - \omega^2 q_k^2),$$

где штрих означает производную по времени  $\eta$ ,  $\omega = \beta k$  – частота осциллятора,  $\beta$  – скорость распространения возмущений в единицах скорости света в вакууме (мы используем энергетические единицы, где  $c = \hbar = 1$ ,  $G^{-1} = M_P$  – масса Планка, индекс  $k$  у поля  $q$  далее опускаем). В случае  $T$ -моды  $q = q_T$  есть поперечно-бесследовая компонента метрики:

$$\alpha_T^2 = \frac{a^2}{8\pi G}, \quad \beta = 1. \quad (3)$$

В случае  $S$ -моды  $q = q_S$  есть линейная суперпозиция возмущение масштабного фактора  $A \equiv \delta a/a$  и потенциала 3-скорости среды  $v \equiv \delta\varphi/w$ :

$$q = A + H v, \quad \alpha_S^2 = \frac{a^2 \gamma}{4\pi G \beta^2}, \quad H = \frac{\dot{a}}{a}, \quad \gamma = -\frac{\dot{H}}{H^2}, \quad (4)$$

где точка означает производную по физическому времени  $t$ . Как видно из (3), поле  $q_T$  минимальным образом связано с фоновой фридмановской метрикой и не зависит от свойств материи. Напротив, связь  $q_S$  с внешним полем (4) более сложна: она

включает как производные от масштабного фактора, так и характеристики среды (скорость распространения возмущений в среде).

Протоматерию в ранней Вселенной можно рассматривать в виде идеальной жидкости с тензором энергии-импульса, зависящим от полной плотности материи  $\rho$ , давления  $p$  и скорости потока  $u^\mu$ . Для  $S$ -моды скорость материи потенциальна и может быть представлена в виде градиента скаляра  $\varphi$ :

$$u_\mu = \frac{\varphi_{,\mu}}{w}, \quad T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu - pg_{\mu\nu},$$

где запятая в индексе означает производную по координате,  $w^2 = \varphi_{,\mu}\varphi_{,\nu}g^{\mu\nu}$  — нормировочный скаляр. Скорость звука задается как коэффициент пропорциональности между сопутствующими возмущениями давления и плотности энергии материи:

$$\delta p_c = \beta^2 \delta \rho_c, \quad (5)$$

где  $\delta X_c \equiv \delta X - \dot{X}v$ , в более общем случае вводится матрица звуковых колебаний. В радиационно-доминированную эпоху  $\beta = 1/\sqrt{3}$ . Примером идеальной среды является теория поля  $\varphi$  с лагранжевой плотностью  $L = L(w, \varphi)$ . Тогда скорость распространения возмущений в материи находится из уравнения [6–8]:

$$\beta^{-2} = \frac{\partial \ln |\partial L / \partial w|}{\partial \ln w},$$

что также соответствует соотношению (5). В большинстве моделей ранней Вселенной полагают  $\beta \sim 1$ .

Эволюция элементарных осцилляторов описывается волновым уравнением:

$$\bar{q}'' + (\omega^2 - U) \bar{q} = 0, \quad (6)$$

где

$$\bar{q} \equiv \alpha q, \quad U \equiv \frac{\alpha''}{\alpha}.$$

Решение этого уравнения имеет две асимптотические ветви поведения: *адиабатическую* ( $\omega^2 > U$ ), когда осциллятор находится в режиме свободных колебаний и его амплитуда возбуждения адиабатически затухает ( $|q| \sim (\alpha\sqrt{\beta})^{-1}$ ), и *параметрическую* ( $\omega^2 < U$ ), где поле  $q$  замораживается ( $q \rightarrow \text{const}$ ). Последнее условие с точки зрения квантовой теории поля означает параметрическое рождение пары частиц из состояния с элементарным возбуждением. Количественно спектры рожденных возмущений зависят от состояния осцилляторов:

$$S \equiv \langle q_S^2 \rangle, \quad T \equiv 2\langle q_T^2 \rangle, \quad (7)$$

коэффициент “2” в выражении для тензорной моды учитывает две поляризации гравитационных волн. Состояние  $\langle \dots \rangle$  считается основным, соответствующим *минимальному* уровню начального возбуждения осцилляторов. В этом состоит главная гипотеза теории Большого взрыва. При наличии адиабатической зоны основное (“in”) вакуумное состояние элементарных осцилляторов *единственно* [9].

Таким образом, полагая, что параметрический потенциал  $U(\eta)$  возрастает со временем и  $\beta \simeq 1$ , получаем универсальный результат для спектров  $T(k)$  и  $S(k)$ :

$$T \simeq \frac{|2 - \gamma|H^2}{M_P^2}, \quad r \simeq 4\gamma,$$

где в момент генерации  $k = \sqrt{U} \simeq aH$ . Как мы видим, теория не дискриминирует моду  $T$  по отношению к  $S$ , все дело в величине фактора  $\gamma$  в эпоху генерации.

Из наблюдаемого факта малости  $T$ -моды (2) получаем верхнее ограничение на энергетический масштаб Большого взрыва и на параметр  $\gamma$  в ранней Вселенной:

$$H < 10^{13} \text{ ГэВ}, \quad \gamma < 0.02.$$

Последнее условие означает, что Большой взрыв носил инфляционный характер ( $\gamma < 1$ ) и справедливо соотношение  $r \simeq -2n_T$ , где  $n_T \equiv d \ln T / d \ln k \simeq -2\gamma$ .

Квантово-гравитационная теория происхождения возмущений предсказывает важнейшую фазовую информацию: рожденные поля имеют *случайную* пространственную и *выделенную* временную фазы – усиливается только растущая ветвь решения. Поясним это, полагая  $U = 0$  на начальной (адиабатической) и конечной (радиационно-доминированной,  $a \propto \eta$ ) стадиях эволюции. Для каждой из вышеупомянутых асимптотик общее решение для фурье-гармоник имеет вид:

$$\bar{q} = C_1 \sin \omega \eta + C_2 \cos \omega \eta,$$

где операторы  $C_1$ ,  $C_2$  задают амплитуды *растущей* и *падающей* ветвей эволюции. В вакуумном состоянии начальная временная фаза полей произвольна:  $\langle |C_1^{(\text{in})}|^2 \rangle = \langle |C_2^{(\text{in})}|^2 \rangle$ . Однако, продолжая решение (6) на радиационно-доминированную стадию, получаем, что в выигрыше оказывается лишь растущая ветвь:

$$\langle |C_1^{(\text{out})}|^2 \rangle \gg \langle |C_2^{(\text{out})}|^2 \rangle.$$

В результате к моменту отсоединения излучения от вещества спектр фотонов промодулирован с фазой  $k = n\pi\sqrt{3}/\eta_{\text{rec}}$ , где  $n$  – натуральное число. Именно эти акустические колебания наблюдаются в спектрах анизотропии реликтового излучения и возмущений плотности, подтверждая тем самым квантово-гравитационное происхождение космологических возмущений плотности.

### 3. Темная энергия – ключ к стандартной модели

Понимание физической природы ТЭ – слабовзаимодействующей физической субстанции, пронизывающей все пространство видимой Вселенной, – является одной из первостепенных задач естествознания. Наблюдения свидетельствуют в пользу того, что ТЭ является не состоянием вакуума, а формой материи (полем).

Действительно, известные энергетические масштабы, характерные для фундаментальных взаимодействий, составляют величины порядка 1 ГэВ (сильное взаимодействие), 100 ГэВ (электрослабое взаимодействие) и  $10^{19}$  ГэВ (гравитационное взаимодействие), и не было никаких оснований думать, что в природе имеется еще один, гораздо меньший масштаб энергий. Однако оказалось, что ТЭ характеризуется энергетическим масштабом  $\sim 10^{-3}$  эВ.

В связи с фундаментальностью проблемы и удивительными свойствами ТЭ важно понимать, какие именно данные наблюдательной космологии лежат в основе представления о существовании ТЭ. Часто в качестве основного наблюдательного довода приводят результаты наблюдений сверхновых типа Ia. Однако это не так, имеется целый ряд других, не менее серьезных аргументов, основанных на комбинациях космологических данных.

Еще к середине 90-х годов XX в. анализ данных галактических каталогов по распределению материи в пространстве, использование совокупности различных методов определения массы «скупенного» вещества<sup>2</sup> совместно с измерениями анизотропии реликтового излучения и параметра Хаббла привели к осознанию того

<sup>2</sup>Измерения пекулярных скоростей галактик в скоплениях и сверхскоплениях, гравитационное линзирование скоплений, измерения кривых вращения галактик, определение соотношения между светимостью и массой, измерение температуры рентгеновских скоплений и т. д.

факта, что полная плотность массы нерелятивистской материи, из которой состоит неоднородная структура – галактики и их образования (группы, скопления, цепочки, стенки, сверхскопления, пустоты) – не превышает 30% от критической плотности:

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho_m}{\rho_c} \lesssim 0.3, \quad (8)$$

где  $\rho_c = 3H_0^2/(8\pi G) \simeq 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>,  $H_0 \simeq 70$  км/с/Мпк.

Результат (8) – один из важнейших в современной космологии. Его довольно распространенная в течение длительного времени интерпретация состояла в том, что Вселенная обладает ненулевой пространственной кривизной. Действительно, если не вводить в рассмотрение ТЭ, то для открытой космологической модели уравнение Фридмана, записанное для современной эпохи, сводится к соотношению

$$\rho_c = \rho_m + \frac{3}{8\pi G R_\chi^2}, \quad (9)$$

где  $R_\chi$  – современный радиус кривизны пространства (ср. с (10)). В соответствии с (8) кривизна (второе слагаемое в правой части (9)) должна доминировать, составляя не менее  $0.7\rho_c$ . Однако с увеличением точности наблюдательных данных такая интерпретация сталкивалась с трудностями. Модель с пространственной кривизной была окончательно отвергнута на основе результатов измерений анизотропии реликтового излучения, точнее, определения положения первого пика в угловом спектре анизотропии, наиболее чувствительного к значению пространственной кривизны. Благодаря этим измерениям стало ясно, что трехмерное пространство с высокой точностью евклидово (то есть  $R_\chi^{-1}$  близко к нулю). Ключевую роль здесь сыграли азростатные эксперименты BOOMERANG и MAXIMA. Впоследствии эксперимент WMAP и другие эксперименты подтвердили этот результат.

Если пространственная кривизна отсутствует, то результат (8) говорит о том, что не менее 70% плотности энергии в современной Вселенной обусловлены наличием такой материи, которая не может быть возмущена гравитационными полями структур и остается «нескученной» в ходе космологической эволюции. Эти требования означают, что эффективное давление этой материи отрицательно и достаточно велико по абсолютной величине, то есть  $p \approx -\rho$ . Это и есть темная энергия.

Структурный аргумент, основанный на комбинации результатов измерения анизотропии и поляризации реликтового излучения и результатов, относящихся к крупномасштабной структуре Вселенной, является сегодня однозначным свидетельством существования ТЭ. Среди других аргументов упомянем наблюдаемый интегральный эффект Сакса–Вольфа, который в будущем должен стать одним из методов прецизионного измерения свойств ТЭ.

#### 4. Квазифридмановская геометрия Вселенной

Обладая удивительными свойствами гравитационной устойчивости, ТЭ тем не менее кардинально влияет на темп образования структур, подавляя гравитационно рост возмущений плотности темной материи.

На стадии линейного развития скалярных возмущений поток гравитирующей материи описывается обобщенным уравнением Фридмана [1, 6, 10], которым можно пользоваться и в тех областях неоднородной Вселенной, где возмущения еще не доросли до нелинейных значений:

$$H_v^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{\varkappa}{b^2}. \quad (10)$$

Соответствующие геометрические переменные  $b = b(t, \mathbf{x})$  и

$$H_v = H_v(t, \mathbf{x}) \equiv \frac{\dot{b}}{b} = \frac{1}{3} u^\mu_{;\mu}$$

– это масштабный и хаббловский факторы объемного расширения среды (точка с запятой в индексе означает ковариантную производную),

$$\varkappa = \varkappa(t, \mathbf{x}) \equiv \frac{2}{3} \Delta q \quad (11)$$

– внутренняя кривизна пространства (ср. с (4)), а  $(t, \mathbf{x})$  – сопутствующие координаты,  $\Delta \equiv \partial^2 / \partial \mathbf{x}^2$  – пространственный лапласиан.

Рассмотрим простейшую модель пострекомбинационной Вселенной, где нерелятивистская материя, включающая ТМ и барионы, описывается холодной пылью ( $p_m \ll \rho_m \propto b^{-3}$ ), а ТЭ – космологической постоянной ( $p_E = -\rho_E = \text{const}$ ):

$$\rho = \rho_E \left( \frac{c}{b^3} + 1 \right), \quad (12)$$

где  $c \equiv \Omega_m / \Omega_E \simeq 0.4$ . В этом случае скаляр кривизны зависит только от пространственных координат  $q = q(\mathbf{x})$  и уравнение (10) сильно упрощается (см. [11]):

$$\left( \frac{\dot{b}}{H_E} \right)^2 = \frac{c}{b} + b^2 - \kappa \equiv f^2(b) - \kappa(\mathbf{x}), \quad (13)$$

где  $H_E = H_0 \sqrt{\Omega_E} \simeq 60$  км/с/Мпк – константа Хаббла темной энергии. Произвольная малая функция пространственных координат  $\kappa = \kappa(\mathbf{x}) \equiv \varkappa / H_E^2$  описывает локальную кривизну пространства. Заметим, что функция

$$f^2(b) \equiv \frac{c}{b} + b^2 \geq 1 \quad (14)$$

имеет минимум  $f_{\min} \simeq 1$ , достигаемый при  $b_{\min}^{-1} \simeq 1.7$ .

Нас интересуют области пространства с положительной правой частью (13):

$$\kappa(\mathbf{x}) < 1, \quad (15)$$

при этом условии плотность материи монотонно убывает со временем. Неравенство (15) включает в себя как области сверхскоплений ( $\kappa > 0$ ), так и космологические войды ( $\kappa < 0$ ).

В местах с  $\kappa = 0$  объемный и фоновый масштабные факторы совпадают (хотя анизотропия расширения остается большой):

$$b = a(t) \equiv \frac{1}{1+z}, \quad H \equiv H_E \frac{f(a)}{a}, \quad (16)$$

где  $f = f(a)$  – фактор роста хаббловской части скорости ( $V_H = f \cdot H_E \mathbf{x}$ ).

В общем случае в линейном порядке по  $\kappa$  получаем

$$b = a \left( 1 - \frac{1}{3} g \kappa \right), \quad \delta_m = g \kappa, \quad (17)$$

$$H_v = H \left( 1 - \frac{1}{3} h \kappa \right), \quad h \equiv \frac{v}{f} = \frac{\dot{g}}{H}, \quad (18)$$

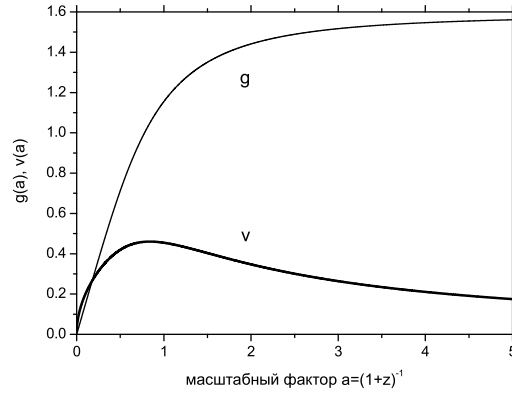


Рис. 1. Факторы роста возмущений плотности  $g(a)$  и пекулярной скорости материи  $v(a)$

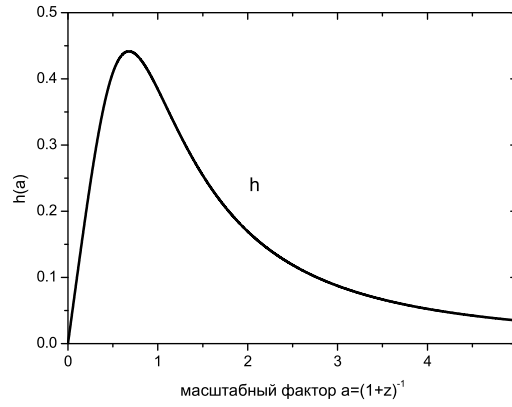


Рис. 2. Функция  $h(a)$  отклонения локальной хаббловской функции от фоновой

где  $\delta_m \equiv \delta\rho_m/\rho_m$  – сопутствующее возмущение плотности,  $g = g(a)$  и  $v = v(a)$  – факторы роста возмущений плотности и пекулярной скорости материи:

$$g(a) = \frac{1}{c} \left( a - H \int_0^a \frac{da}{H} \right), \quad v(a) = \frac{3H_E}{2a^2} \int_0^a \frac{da}{H}. \quad (19)$$

Уравнения (10)–(19) описывают квазихаббловские течения с объемным хаббловским фактором  $H_v$ , зависящим от местоположения наблюдателя. Функции  $g(a)$  и  $v(a)$  изображены на рис. 1. В современную эпоху ( $a = 1$ ) функция  $v$  имеет широкий максимум, свидетельствующий о периоде наиболее интенсивной генерации структуры. Положение максимума  $v(a)$  соответствует  $z \simeq 0.2$ , уровень 0.9 от максимального значения достигается при  $a \simeq 0.5$  и 1.4, а половина – при  $a \simeq 0.1$  и 4. Таким образом, современная эпоха – это эпоха максимальных пекулярных скоростей, которая продлится еще космологическое время. Функция  $v$  затухнет вдвое лишь к тому времени, когда возраст Вселенной будет составлять 35 млрд. лет. И только тогда можно будет сказать о наступлении эпохи подавления пекулярных скоростей во всех областях пространства, где  $\kappa < 1$ .

Функция  $h(a)$  определяет степень отклонения локальной хаббловской функции от фоновой. Максимум  $h(a)$  достигается при  $z \simeq 0.4$ , а период  $h > 0.5h_{\max}$  соответствует  $a \in (0.1, 1.8)$ , или возрасту от 0.6 до 22 млрд. лет. Рис. 2 демонстрирует, что наша Вселенная находится на этапе максимального искажения хаббловского



закона расширения, а восстановление хаббловских течений произойдет лишь через 10 млрд. лет. Итак, мы можем заключить, что формирование крупномасштабной структуры во Вселенной происходит в период от 1 до 20 млрд. лет с момента Большого взрыва.

Подчеркнем, что сделанные выше выводы о влиянии ТЭ на формирование структуры справедливы и в более общем случае ( $p_E \simeq -\rho_E$ ). В модели сверхслабого поля плотность ТЭ также вначале заморожена (постоянна), однако под воздействием собственной гравитации она начнет изменяться в будущем и релаксировать к нулю в течение многих хаббловских эпох.

Привлекательность идеи сверхслабого поля связана, в частности, с тем, что объяснить ненулевое, но невероятно малое по сравнению с масштабами энергий известных взаимодействий значение энергии вакуума чрезвычайно трудно. Гораздо проще представить себе, что энергия вакуума в начале эволюции Вселенной (задолго до известных стадий) релаксировала практически до нуля, и дальнейшая динамика расширения доминировалась разными компонентами среды, оставшимися после Большого взрыва и «сменявшимися» друг-друга в ходе времени. Образно можно сказать, что вся история Вселенной – это история релаксации полей, выведенных из состояния равновесия в эпоху Большого взрыва<sup>3</sup>.

## 5. Уроки экстраполяции

Подведем итог главным урокам геометрической экстраполяции, следующим из ОТО и наблюдательной космологии.

Начнем с геометрии в нулевом порядке – она адекватно описывается моделью Фридмана и фиксирована значениями космологических параметров, полученных из анализа астрономических данных. Подстановка этих параметров в уравнения Фридмана дает хаббловскую функцию  $H(a)$  и ее производную  $\gamma(a)$ , допускающие экстраполяцию по масштабному фактору  $a$  и в прошлое, и в будущее:

$$\frac{H}{H_0} = 10^{61} \frac{H}{M_P} \simeq \left( \frac{10^{-4}}{a^4} + \frac{0.3}{a^3} + 0.7 \right)^{1/2}, \quad (20)$$

$$\gamma = -\frac{d \ln H}{d \ln a} \simeq \frac{2(10^{-4} + 0.2a)}{10^{-4} + 0.3a + 0.7a^4}. \quad (21)$$

Слагаемые в круглых скобках (20) соответствуют радиации, нерелятивистской материи и ТЭ. Напомним хаббловский и планковский масштабы в разных единицах измерений:  $H_0^{-1} \simeq 14$  млрд. лет = 4.3 Гпк =  $10^{33}$  эВ<sup>-1</sup>,  $M_P = 10^{19}$  ГэВ =  $\ell_P^{-1} = 10^{33}$  см<sup>-1</sup>.

В уравнениях (20)–(21) нет свободных параметров. Строгость временной экстраполяции ограничена только точностью численных коэффициентов и скрытыми параметрами в погрешностях наблюдений. Какие уроки мы можем извлечь из эволюции, описываемой этими простыми уравнениями?

Из уравнения (20) следует, что известные нам динамические переходы от доминирования радиации к нерелятивистской материи и далее к ТЭ происходили при малых энергиях, хорошо известных в атомной физике ( $T \simeq 2.5 \cdot 10^{-4} a^{-1}$  эВ). При дальнейшей экстраполяции в прошлое

$$H \rightarrow \frac{H_0}{(10a)^2} \simeq \frac{M_P}{(10^{31}a)^2}, \quad \gamma \rightarrow 2 \quad (22)$$

мы приходим к следующим выводам о свойствах Вселенной.

<sup>3</sup>Другие возможности объяснения ускоренного расширения Вселенной связаны с модификацией гравитации на сверхбольших расстояниях и космологических временах (идеи многомерия, расширения ОТО до скалярно-тензорной теории и др.)

Вселенная большая: ее физический размер в начале радиационно-доминированной эпохи, как минимум, в  $\sim 10^{30}$  раз превосходил планковский масштаб<sup>4</sup>. Этот большой фактор можно объяснить существованием короткой предшествовавшей (22) инфляционной стадии с числом хаббловских эпох  $N \sim \ln 10^{30} = 70$ .

Уравнение (21) описывает *распад*  $\gamma$  от 2 до 0.4. Космологические возмущения, индуцировавшие образование структуры, «пришли» из причинно-несвязанной области: образно можно сказать, что масштабы «входят» внутрь горизонта при  $\gamma > 1$ . Чтобы объяснить, каким образом начальные возмущения оказались в не причинной зоне, необходим предшествовавший (22) период расширения с *растущей* функцией  $\gamma$ , начиная от значений, меньших единицы.

Оба эти *прямые* аргументы указывают на наличие в истории ранней Вселенной периода с инфляционной динамикой. К ним можно добавить теоретический результат о неизбежном образовании хаббловского потока из первоначально неоднородного распределения гравитирующей среды при ее локально-инфляционном расширении (см. [1]). Если первые два аргумента вытекают из экстраполяции ОТО к большим энергиям, то последний является внутренним свойством ОТО и никак не ограничен масштабами энергий. Существует также ряд *косвенных* свидетельств в пользу инфляционной динамики Большого взрыва: плоскостность 3-пространства, море реликтовых фотонов, оставшихся после распада инфлатона, и др.

Важнейшие динамические свойства Вселенной мы узнаём из описания геометрии в первом порядке. Говоря о Вселенной, мы подразумеваем хаббловский поток. Создание Вселенной – это *создание* хаббловского потока. Противоположный ему процесс *разрушения* хаббловского потока мы называем гравитационной неустойчивостью и, в конечном счете, образованием структуры во Вселенной.

Гравитационная неустойчивость может динамически развиваться только в нерелятивистской среде, состоящей из слабовзаимодействующих частиц, поскольку наличие давления препятствует росту неоднородностей плотности. В нашей Вселенной роль такой среды выполняет ТМ. Однако логарифмический рост контраста плотности ТМ на стадии доминирования радиации недостаточен для развития структур. Для ускорения темпа роста возмущений необходимо доминирование самой ТМ, что неизбежно наступает в некоторый момент времени в силу того, что плотность ТМ уменьшается медленнее, чем плотность радиации.

Однако если во Вселенной существуют другие формы материи с эффективным отрицательным давлением, то их плотности энергий изменяются со временем еще медленнее, чем у ТМ, и эти формы рано или поздно прекращают стадию доминирования ТМ и останавливают развитие гравитационной неустойчивости. Именно так и происходит в нашей Вселенной. 3.5 млрд. лет назад, когда плотность ТЭ начала динамически доминировать во Вселенной<sup>5</sup>, началось неспешное по меркам текущего хаббловского радиуса закрытие окна гравитационной неустойчивости. Сам процесс подавления роста линейных неоднородностей развивается за время динамического влияния ТЭ, которое составляет  $H_E^{-1} \simeq 17$  млрд. лет.

Квантово-гравитационная теория генерации космологических возмущений плотности была создана в 1980 г. [5, 6] и выдержала испытание временем. Гейзенберговское состояние элементарных гармонических осцилляторов с импульсом  $\mathbf{k}$ , описывающих эволюцию скалярных степеней свободы возмущений кривизны

<sup>4</sup>Начальный физический размер видимой Вселенной  $a_P H_0^{-1} \sim 10^{-3}$  см совпадает по порядку величины с сегодняшней длиной реликтового кванта, который, в свою очередь, сопоставим с сопутствующим планковским масштабом  $\ell_P a_P^{-1} \sim 10^{-2}$  см, где  $a_P^{-1} \sim 10^{31}$  – максимальный фактор расширения Вселенной в режиме (20) за все время жизни Вселенной  $(H_0 \ell_P)^{-1} = 10^{61}$ . Эта оценка вселяет надежду, что в наблюдательных данных может содержаться информация о начале инфляционной стадии Большого взрыва.

<sup>5</sup>При этом параметр  $\gamma$  пересек уровень  $\gamma = 1$  несколько ранее, около 7 млрд. лет назад.

в геометрии Фридмана, соответствует начальным вакуумным флуктуациям плотности в однородной гравитирующей среде. Причиной рождения возмущения является гравитационное поле хаббловского потока расширяющейся материи, которое параметрически воздействует на элементарные осцилляторы. Неоднородности кривизны в геометрии Фридмана описываются теорией безмассового скалярного поля и представляют тем самым огромный интерес, поскольку, с одной стороны, имеется хорошо понимаемая физика их происхождения, а с другой – они послужили затравками для образования галактик и наблюдаемой крупномасштабной структуры Вселенной.

Рожденные параметрическим образом космологические поля возмущений обладают целым рядом характерных признаков и свойств, которые подтверждаются наблюдениями. Прежде всего, это *наблюдаемые* случайная пространственная фаза и гауссова статистика догалактических возмущений поля плотности. Данное свойство изначально присуще скалярным вакуумным флуктуациям, и оно *линейным* образом передается рожденным неоднородностям кривизны и связанному с ними полю плотности. Другой факт – выделенная временная фаза скалярных неоднородностей, соответствующая растущей ветви эволюции. Это общее свойство затравочных возмущений плотности для образования космологической структуры, было, по-видимому, впервые предсказано А.Д. Сахаровым в 1965 г. [12]. Однако долгое время оставался открытым вопрос, как физически образуется именно *растущая* мода линейных возмущений кривизны с достаточно большой амплитудой ( $\sim 10^{-5}$ ) из первоначально *случайных по временной фазе* и ничтожных по величине вакуумных флуктуаций плотности. Данное свойство внутренне присуще самому параметрическому эффекту, усиливающему *только* растущее решение до практически *произвольной* амплитуды (но меньшей единицы) в зависимости от космологических параметров хаббловского потока  $H$  и  $\gamma$  (см. (5)). Это важнейшее свойство теории подтверждается наблюдаемыми звуковыми модуляциями спектров мощности возмущений плотности и реликтового излучения.

Часто перечисленные факты связывают с инфляцией. Однако это не так. *Случайная* пространственная и *детерминированная* временная фазы рожденных неоднородностей являются *визитной карточкой* квантово-гравитационного эффекта рождения безмассовых полей, к которым принадлежат  $S$ - и  $T$ -моды космологических возмущений. Эти два свойства присущи *любым* динамическим режимам хаббловского расширения, включая, в частности, и инфляционные.

Какие свойства геометрии первого порядка свидетельствуют об инфляционном Большом взрыве?

Наблюдаемое верхнее ограничение на амплитуду космологических гравитационных волн, указывающее на малость параметра  $\gamma < 1$  в эпоху генерации возмущений, можно считать косвенным аргументом в пользу инфляционной ранней Вселенной. Окончательное доказательство первичной инфляции по первому порядку геометрии станет возможным только после обнаружения  $T$ -моды космологических возмущений и проверки теоретически предсказанной связи показателя наклона  $T$ -спектра с величиной параметра  $r \simeq -2n_T$ . Это может случиться уже в ближайшее время при обработке данных космических экспериментов по измерению анизотропии и поляризации реликтового излучения. Напомним в этой связи, что простейшая модель инфляции на массивном скалярном поле предсказывает величину  $r$  всего лишь в четыре раза, меньшую текущего верхнего ограничения [13].

Часто в качестве доказательства инфляции приводят наблюдаемую плоскую форму  $S$ -спектра ( $n_S \simeq 0$ ). Напомним, что такой аргумент некорректен: инфляционные модели позволяют получить *произвольный* наклон  $S$ -спектра в зависимости от значения параметров. Другое дело –  $T$ -спектр: он всегда близок к плоскому в инфляционных сценариях и его наклон жестко связан с  $r$ -параметром. Поэтому

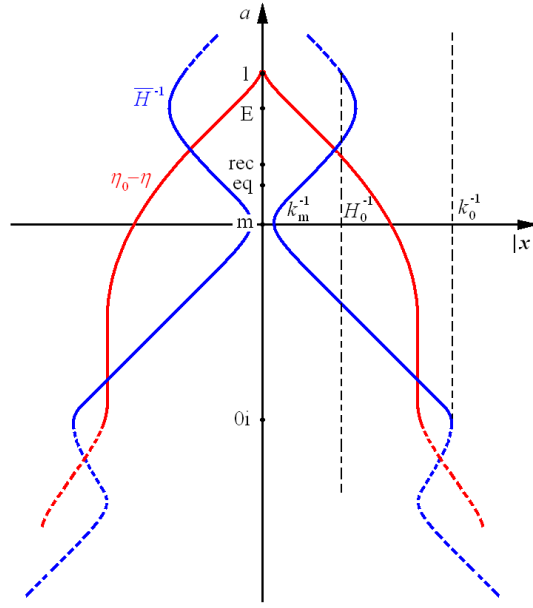


Рис. 3. Окрестность наблюдателя в координатах  $(a, |x|)$ . Синяя линия – хаббловский радиус, красная – световой конус прошлого,  $m$  – конец первичной,  $E$  – начало новой инфляций,  $k_0^{-1}$  – размер фридмановского мира

обнаружение  $T$ -моды явилось бы прямым доказательством (или опровержением) первичной инфляции.

Предельно возможная геометрическая экстраполяция к моменту окончания инфляционного Большого взрыва и/или началу радиационно-доминированной стадии расширения достигается при условии того, что амплитуда космологических гравитационных волн находится вблизи наблюдаемого верхнего ограничения:

$$\sqrt{HM_P} \rightarrow 10^{16} \text{ ГэВ} \gtrsim 10^{-4} a^{-1} \text{ эВ.} \quad (23)$$

Отсюда получаем оценку минимального масштабного фактора Вселенной

$$a_{\min} \sim 10^{-29},$$

и минимального хаббловского (сопутствующего) радиуса Вселенной к моменту окончания инфляции

$$k_m^{-1} \equiv (aH)_{\min}^{-1} \sim 1 \text{ м.}$$

Таким образом, наблюдательная космология дает уникальную информацию не только о физике высоких энергий, недоступных ускорительным экспериментам. С ее помощью проверяется теория гравитации на 30(!) порядков по масштабному фактору и энергетической шкале, что является беспрецедентным опытом науки.

Наблюдательных оснований для дальнейшей экстраполяции к более высоким энергиям, чем (23), у нас пока нет. Мы не знаем, сколько длилась последняя стадия инфляционного взрыва (их могло быть несколько), которая сгенерировала космологические возмущения для образования наблюдаемой структуры Вселенной. Если продолжительность этой стадии была не очень большой, то следы доинфляционной динамики должны проявиться в аномалиях крупномасштабного спектра неоднородностей, в частности в квадрупольной аномалии. Точная космология способна будет прояснить и этот вопрос. Рис. 3 иллюстрирует область экстраполяции наблюдательной космологии.

Уроки экстраполяции обогащают нас знаниями об истории Вселенной и могут быть применены, в том числе, и для экстраполяции в будущее. Существование инфляционной стадии в ранней Вселенной подсказывает разгадку физической природы ТЭ.

Действительно, за 13.7 млрд. лет своего существования Вселенная прошла по крайней мере *одну* радиационную ( $\gamma = 2$ ) и *одну* материальную ( $\gamma = 3/2$ ) стадии, но *дважды* находилась в состоянии инфляции – первичной (Большой взрыв) и новой (ТЭ). Два – это уже повторение: стадий с  $\gamma < 1$  могло быть и больше, и физические причины их возникновения и распада могли быть схожими. Анализируя крупномасштабную структуру Вселенной и продукты распада первичной инфляции (реликтовые фотоны, барионы и др.), мы изучаем физику *конца* инфляционной стадии Большого взрыва. В то же время мы все свидетели *начала* новой стадии инфляции, управляемой темной энергией. Предполагая схожие физические причины обеих стадий, мы приходим к выводу, что каждая из них имела свое начало и свой конец.

Проиллюстрируем это на примере слабовзаимодействующих массивных полей с разными начальными значениями и массами. Каждая инфляционная стадия начинается с доминирования очередного массивного поля, протекает в режиме медленного скатывания и заканчивается переходом в стадию осцилляций (доминирования нерелятивистских частиц данного поля) или распадом на маломассивные частицы. К началу очередной инфляционной стадии соответствующее поле «заморожено» и его плотность практически неотличима от космологической постоянной. В ходе доминирования поле «ощущает», воздействие собственной гравитации, приходит в движение и дрейфует к точке равновесия. Этот динамический переход от состояния  $\Lambda$ -члена к медленному скатыванию происходит в течение одной хаббловской эпохи в начале данной стадии инфляции.

В этом примере история Вселенной предстает историей возникновения и распада (релаксации) массивных полей. ТЭ может быть одним из таких массивных полей. Она принципиально не отличается от инфлатона в ранней Вселенной, имея по сравнению с ним лишь другие значения параметров. Отметим, что первая хаббловская эпоха доминирования ТЭ еще не прошла, она только наступила и будет длиться еще 13 млрд. лет. Тем не менее найти наблюдательные свидетельства эволюции ТЭ представляется нам возможным (см. [1]).

### Заключение

Проблема образования начальных космологических возмущений и крупномасштабной структуры Вселенной сегодня в принципе решена. Формирование крупномасштабной структуры Вселенной происходит в результате совместного действия двух совершенно различных физических механизмов: эффект квантово-гравитационного рождения безмассовых полей в ранней Вселенной обеспечивает первичные возмущения плотности, а гравитационная неустойчивость превращает их в структуру. Причем последнее происходит только в том случае, если во Вселенной доминирует нерелятивистская материя. Таким образом, для образования нелинейной структуры нужны, вообще говоря, два условия: наличие длительного материально-доминированного периода и необходимая начальная амплитуда возмущений. В нашей Вселенной оба условия выполнены. Подчеркнем, что это выполнение никак не связано с антропным принципом, поскольку условие формирования звезд в нелинейных гало ТМ выглядит совсем по-другому:  $\rho_R \ll \rho_b \lesssim \rho_M$ .

Другой удивительный подарок природы состоит в том, что в настоящее время в спектре реликтового излучения мы можем воочию наблюдать возмущения, бывшие когда-то квантовыми. Это, кроме всего прочего, доказывает, что наши физические

представления о микромире остаются справедливыми вплоть до периода, когда происходила интенсивная генерация возмущений. Окончательное подтверждение теории квантово-гравитационного рождения возмущений в ранней Вселенной получит после обнаружения  $T$ -моды, что может произойти уже в ближайшее время. Современные инструменты и технологии вполне способны решить задачу о регистрации столь малых сигналов по данным наблюдений анизотропии и поляризации реликтового излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-02-12163\_офи) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № П1336).

### Summary

*V.N. Lukash, E.V. Mikheeva.* Pillars of Physical Cosmology.

The article deals with the achievements in physical cosmology based on the standard model of the Universe, and its development.

**Key words:** cosmological standard model, primordial cosmological perturbations, formation of structure in the Universe.

### Литература

1. Лукаш В.Н., Михеева Е.В. Физическая космология. – М.: Физматлит, 2010. – 404 с.
2. Гриб А.А., Мамаев С.Г., Мостепаненко В.М. Квантовые эффекты в интенсивных внешних полях. – М.: Энергоатомиздат, 1980. – 288 с.
3. Зельдович Я.Б., Старобинский А.А. Рождение частиц и поляризация вакуума в анизотропном гравитационном поле // Журн. эксперим. и теор. физики. – 1971. – Т. 61, Вып. 6. – С. 2161–2175.
4. Грицуик Л.П. Усиление гравитационных волн в изотропной Вселенной // Журн. эксперим. и теор. физики. – 1974. – Т. 67, Вып. 3. – С. 825–837.
5. Лукаш В.Н. Рождение звуковых волн в ранней Вселенной // Письма в Журн. эксперим. и теор. физики. – 1980. – Т. 31, Вып. 11. – С. 631–635.
6. Лукаш В.Н. Рождение звуковых волн в изотропной Вселенной // Журн. эксперим. и теор. физики. – 1980. – Т. 79, Вып. 6. – С. 1601–1616.
7. Lukash V.N. The very early Universe. – 1999. – arXiv:astro-ph/9910009v2.
8. Строков В.Н. О лагранжевой теории космологических возмущений плотности // Астрон. журн. – 2007. – Т. 84, № 7. – С. 483–486.
9. Лукаш В.Н. О соотношении тензорной и скалярной мод возмущений в космологии Фридмана // Усп. физ. наук. – 2006. – Т. 176, Вып. 1. – С. 113–116.
10. Лукаш В.Н., Михеева Е.В. Темная материя: от начальных условий до образования структуры Вселенной // Усп. физ. наук. – 2007. – Т. 177, Вып. 9. – С. 1023–1028.
11. Лукаш В.Н., Рубаков В.А. Темная энергия: мифы и реальность // Усп. физ. наук. – 2008. – Т. 178, Вып. 3. – С. 301–308.
12. Сахаров А.Д. Начальная стадия расширения Вселенной // Журн. эксперим. и теор. физики. – 1965. – Т. 49, Вып. 1. – С. 345–358.
13. Lukash V.N., Mikheeva E.V.  $\Lambda$ -inflation and CMB anisotropy // Int. J. Modern Phys. A. – 2000. – V. 15, No 24. – P. 3783–3804.

Поступила в редакцию  
19.06.10

**Лукаш Владимир Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом теоретической астрофизики Астрокосмического центра ФИАН им. П.Н. Лебедева, г. Москва.

E-mail: *lukash@asc.rssi.ru*

**Михеева Елена Владимировна** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Астрокосмического центра ФИАН им. П.Н. Лебедева, г. Москва.

E-mail: *helen@asc.rssi.ru*